



## DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(51) Classification internationale des brevets <sup>6</sup> : <b>G21C 3/326</b>	<b>A1</b>	(11) Numéro de publication internationale: <b>WO 96/20484</b>
		(43) Date de publication internationale: 4 juillet 1996 (04.07.96)

(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR95/01700

(22) Date de dépôt international: 20 décembre 1995 (20.12.95)

(30) Données relatives à la priorité:  
94/15593 23 décembre 1994 (23.12.94) FR

(71) Déposants (pour tous les Etats désignés sauf US): FRAM-ATOME [FR/FR]; Tour Fiat, 1, place de la Coupole, F-92084 Paris-La Défense (FR). COMPAGNIE GENERALE DES MATIERES NUCLEAIRES [FR/FR]; 2, rue Paul-Dautier, F-78140 Vélizy-Villacoublay (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (US seulement): ROMARY, Jean-Michel [FR/FR]; 38, rue Crillon, F-69006 Lyon (FR). BONNIAUD, Michel [FR/FR]; 2, allée des Glycines, F-69150 Décines-Charpieu (FR).

(74) Mandataire: FORT, Jacques; Cabinet Plasseraud, 84, rue d'Amsterdam, F-75440 Paris Cédex 09 (FR).

(81) Etats désignés: CN, CZ, FI, HU, KR, SK, US, brevet européen (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

## Publiée

*Avec rapport de recherche internationale.  
Avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si de telles modifications sont reçues.*

(54) Title: FUEL ASSEMBLY WITH CONSUMABLE POISON AND METHOD FOR EXPLOITING A REACTOR BY IMPLEMENTATION OF SUCH ASSEMBLY

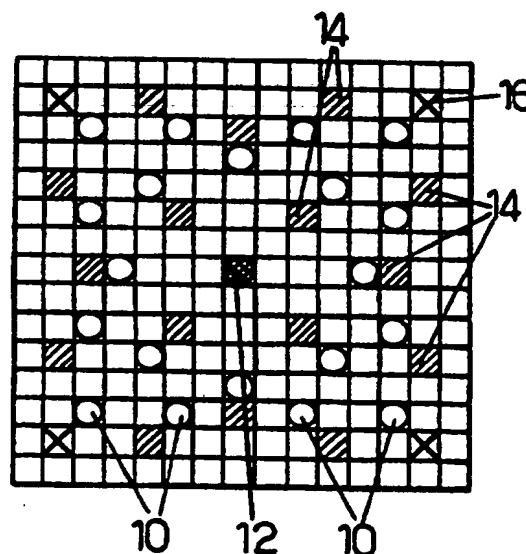
(54) Titre: ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE A POISON CONSOMMABLE ET PROCEDE D'EXPLOITATION DE REACTEUR METTANT EN ŒUVRE UN TEL ASSEMBLAGE

## (57) Abstract

A fuel assembly, intended to a pressurized water reactor, comprises fuel rods at the nodes of a square network containing fuel material. Some of said fuel rods have a first mass content of gadolinium comprised between 5 and 12 %. From four to twelve additional rods (16) have a gadolinium content comprised between 0.5 and 2 %.

## (57) Abrégé

L'assemblage combustible, destiné à un réacteur à eau sous pression, comprend des crayons répartis aux nœuds d'un réseau carré et contenant du matériau combustible. Certains des crayons ont une première teneur massique en gadolinium comprise entre 5 et 12 %. Quatre à douze crayons supplémentaires (16) ont une teneur en gadolinium comprise entre 0,5 et 2 %.



### UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AT	Arménie	GB	Royaume-Uni	MW	Malawi
AT	Autriche	GE	Géorgie	MX	Mexique
AU	Australie	GN	Guinée	NE	Niger
BB	Barbade	GR	Grèce	NL	Pays-Bas
BE	Belgique	HU	Hongrie	NO	Norvège
BF	Burkina Faso	IE	Irlande	NZ	Nouvelle-Zélande
BG	Bulgarie	IT	Italie	PL	Pologne
BJ	Bénin	JP	Japon	PT	Portugal
BR	Brésil	KE	Kenya	RO	Roumanie
BY	Bélarus	KG	Kirghizistan	RU	Fédération de Russie
CA	Canada	KP	République populaire démocratique de Corée	SD	Soudan
CF	République centrafricaine	KR	République de Corée	SE	Suède
CG	Congo	KZ	Kazakhstan	SG	Singapour
CH	Suisse	LI	Liechtenstein	SI	Slovénie
CI	Côte d'Ivoire	LK	Sri Lanka	SK	Slovaquie
CM	Cameroun	LR	Libéria	SN	Sénégal
CN	Chine	LT	Lituanie	SZ	Swaziland
CS	Tchécoslovaquie	LU	Luxembourg	TD	Tchad
CZ	République tchèque	LV	Lettonie	TG	Togo
DE	Allemagne	MC	Monaco	TJ	Tadjikistan
DK	Danemark	MD	République de Moldova	TT	Trinité-et-Tobago
EE	Estonie	MG	Madagascar	UA	Ukraine
ES	Espagne	ML	Mali	UG	Ouganda
FI	Finlande	MN	Mongolie	US	Etats-Unis d'Amérique
FR	France	MR	Mauritanie	UZ	Ouzbékistan
GA	Gabon			VN	Viet Nam

5      **ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE A POISON CONSOMMABLE ET PROCEDE  
D'EXPLOITATION DE REACTEUR METTANT EN OEUVRE UN TEL ASSEM-  
BLAGE**

10      L'invention concerne les assemblages combustibles pour  
réacteur à eau sous pression et, plus particulièrement, les  
assemblages du type comprenant des crayons de combustible  
répartis aux noeuds d'un réseau carré, dont au moins la  
plupart contient un matériau combustible qui est, pour la  
plupart au moins des crayons, de l'oxyde d'uranium enrichi  
15      en isotope 235 et/ou en plutonium ; les crayons sont généra-  
lement portés par un squelette ayant deux embouts reliés par  
des tubes guides et des grilles de maintien des crayons.

20      On connaît déjà des assemblages de ce type dans lesquels  
quelques-uns (moins d'un sur dix en général) des crayons de  
combustible contiennent un poison neutronique constitué de  
gadolinium à une teneur massique comprise entre 5 et 12 %.  
Le rôle du gadolinium est double. Il permet de réduire la  
réactivité initiale du coeur après un rechargement partiel  
ou total en assemblages combustibles neufs, du fait de son  
25      absorption de neutrons. La disparition progressive du gadoli-  
nium compense l'épuisement progressif du combustible. Grâce  
à une répartition appropriée des assemblages combustibles  
contenant du gadolinium dans le coeur, il permet d'arriver  
à une répartition radiale plus régulière de la puissance, et  
30      cela pendant tout un cycle de fonctionnement du coeur avant  
rechargement.

35      L'utilisation de tels assemblages, où les crayons qui  
contiennent du gadolinium ont tous la même teneur, a effecti-  
vement un effet favorable du point de vue de la réduction de  
réactivité en début de chaque cycle, avec corrélativement une  
réduction de la concentration nécessaire en bore dans l'eau,  
et une bonne distribution radiale du flux neutronique. Mais  
il n'est plus possible d'arriver à une gestion satisfaisante  
du coeur, lorsqu'on souhaite allonger la durée de chaque  
40      cycle d'utilisation du coeur à des périodes de 18 à 24 mois

et/ou lorsqu'il est nécessaire de limiter les fuites neutro-  
niques radiales pour une meilleure utilisation du combusti-  
ble.

La présente invention vise notamment à fournir un  
5 assemblage combustible permettant une gestion plus favorable  
des coeurs, dans lesquels la réactivité initiale est élevée.

L'invention utilise la constatation que l'anti-réactivité  
initiale (c'est-à-dire dans un crayon neuf) apportée par le  
gadolinium présent dans le crayon n'est pas proportionnelle  
10 à sa teneur, mais augmente beaucoup moins vite avec la teneur  
dès que l'on dépasse une teneur de 1 % environ.

L'invention propose en conséquence un assemblage du type  
ci-dessus défini dans lequel les crayons comprennent, en plus  
de crayons ayant une teneur massique comprise entre 5 et  
15 10 % environ de gadolinium, quatre à douze crayons ayant une  
teneur comprise entre 0,5 et 2 %, et ayant avantageusement  
1 % environ, de gadolinium.

L'anti-réactivité des crayons à faible teneur en gadoli-  
nium diminuera beaucoup plus vite, à partir du début du cycle  
20 du réacteur, que celle des crayons à teneur nettement plus  
élevée. Ainsi, les crayons à faible teneur en gadolinium  
compensent la forte réactivité excédentaire initiale et  
permettent de dégager des marges sur le coefficient modéra-  
teur, sans pour autant avoir un effet défavorable sur la  
25 distribution radiale de puissance au cours du cycle.

On peut considérer que l'invention permet d'agir indé-  
pendamment sur les deux fonctions du gadolinium, réduire la  
réactivité initiale et contrôler la distribution radiale du  
flux. Dans le cas d'une seule teneur, la première fonction  
30 n'aurait pu être remplie, pour un cycle long, qu'avec un  
nombre élevé de crayons à 10 à 12 % de gadolinium qui aurait  
détérioré le contrôle de la distribution de puissance, en  
particulier en fin de cycle, lors de la disparition progres-  
sive du gadolinium.

35 Les caractéristiques ci-dessus, ainsi que d'autres,  
apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit

de modes particuliers de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs. La description se réfère aux dessins qui l'accompagnent, dans lesquels :

5 - la figure 1 est une vue schématique en plan montrant la répartition des crayons de combustibles dans un premier assemblage conforme à l'invention ;

10 - la figure 2 montre la variation de l'anti-réactivité d'un crayon en fonction de sa teneur en Gd, dans deux assemblages ayant respectivement du combustible oxyde enrichi à 4,50 % d'uranium 235 (courbe en trait plein) et à 3,90 % (courbe en tirets) ;

15 - la figure 3 est un schéma montrant une répartition possible des assemblages dans un quart du coeur d'un réacteur nucléaire, suivant un mode de mise en oeuvre des assemblages.

20 - la figure 4, similaire à la figure 1, montre une seconde répartition, à huit crayons à teneur en gadolinium élevée ; et

25 - les figures 5 et 6 montrent l'évolution du facteur de pic de puissance en cours du temps.

30 On ne décrira pas ici la constitution complète d'un assemblage auquel s'applique l'invention, car cette constitution peut être classique. La figure 1 montre seulement 15 x 15 emplacements occupés par des crayons combustibles et des tubes guides 10 dans un assemblage d'un genre couramment utilisé à l'heure actuelle. L'emplacement central 12 est occupé par un tube d'instrumentation. Les autres emplacements sont occupés par des crayons de combustible.

35 On connaît déjà des assemblages dont seize crayons 14, indiqués par des hachures sur la figure 1, ont une teneur initiale en oxyde de gadolinium de 10 % massique. Cette teneur n'est pas limitative. Pour des réacteurs différents, il serait possible d'adopter une teneur plus faible, par exemple comprise entre 5 % et 10 %. Il serait même possible de dépasser légèrement une teneur de 10 % et d'aller jusqu'à 12 %. Suivant le réacteur les crayons contenant du gadolinium contiennent soit de l'uranium enrichi en U235 ou en pluto-

nium, à un enrichissement égal ou inférieur à celui des crayons voisins, soit de l'uranium naturel soit même de l'uranium appauvri. Dans d'autres cas, quatre à douze crayons 14, ou vingt crayons 14 sont prévus.

5 Dans les assemblages actuels, tous les crayons contenant un poison consommable ont la même teneur en gadolinium. Ces crayons sont répartis de façon régulière.

Dans l'assemblage suivant l'invention montré en figure 1, quatre crayons 16, indiqués par des croix, contiennent une  
10 faible teneur initiale en gadolinium. Ces crayons 16 sont disposés à proximité des angles de l'assemblage, par exemple à l'avant-dernier emplacement de chaque diagonale, lorsque la répartition des crayons 14 est celle mentionnée plus haut. Le même choix de support en uranium que pour les crayons à  
15 10 % de gadolinium est possible.

La figure 2 montre que le rapport des anti-réactivités initiales apportées par un crayon 14 et par un crayon 16 n'est pas proportionnel au rapport des teneurs en gadolinium. On voit par exemple sur la figure 2 que, pour un assemblage  
20 constitué de crayons d'enrichissement initial de 4,50 % (rapport  $U\ 235/U\ 238 + U\ 235$ ) l'anti-réactivité apportée par 1 % de gadolinium est d'un peu plus de 500 pcm (partie par cent mille) alors que l'anti-réactivité apportée par 8 % de gadolinium n'est que de 750 pcm environ. Une réduction de la  
25 teneur initiale en gadolinium dans un rapport de 8 à 1 ne se traduit donc que par une réduction de l'anti-réactivité dans un rapport de 1,47 à 1 environ.

La figure 3 montre, toujours à titre d'exemple, une répartition possible d'assemblages combustibles après  
30 remplacement d'un tiers des assemblages par des assemblages neufs. Les emplacements hachurés sont occupés par des assemblages ayant déjà effectué un ou deux passages en réacteur.

Les assemblages occupant les emplacements qui ne portent  
35 aucune indication sont dépourvus de gadolinium. Les autres contiennent quatre crayons contenant du gadolinium à la

seconde teneur, c'est-à-dire 1 % environ. Ils contiennent également soit seize crayons ayant du gadolinium à 10 %, du genre montré en figure 1, soit huit crayons seulement contenant du gadolinium à 10 % à la première teneur, suivant la disposition montrée en figure 4, où les éléments correspondants à ceux de la figure 1 portent le même numéro de référence.

Comme on l'a indiqué plus haut, le combustible des crayons contenant du gadolinium peut avoir diverses compositions. Cependant, il est apparu en général préférable d'adopter, pour les crayons contenant du gadolinium à la seconde teneur, un enrichissement proche de celui des crayons avoisinants sans gadolinium.

Ce résultat apparaît notamment lorsque l'on compare les résultats obtenus avec diverses teneurs du combustible en U235. Des essais ont notamment été effectués avec des assemblages ayant seize crayons à 10 % Gd et quatre crayons à 1 % Gd, les assemblages étant au nombre tel qu'il y ait cent douze crayons à 1 % Gd au total. La figure 5 montre les résultats obtenus avec des crayons à 1 % Gd et combustible en oxyde d'uranium appauvri à 0,25 % d'uranium 235, en oxyde d'uranium enrichi à 2,30 % d'uranium 235 et en uranium enrichi à 3,90 % en uranium 235 (c'est-à-dire en même enrichissement que les crayons sans poison avoisinant). On constate l'intérêt d'adopter le même enrichissement pour tous les crayons, puisqu'il y a alors peu de dégradation du facteur de pic de puissance radiale  $F_{xy}$  par rapport à une gestion du type actuel, avec une durée de cycle de l'ordre de 350 jepp (jours équivalent pleine puissance).

D'autres essais ont montré que dans tous les cas la concentration initiale en bore pouvait être notablement réduite.

Le résultat peut être encore amélioré en ajoutant également quatre crayons à 1 % Gd dans les assemblages ne contenant que huit crayons à 10 % Gd, le nombre total de crayons contenant 1 % Gd étant alors de cent soixante pour

l'ensemble du coeur. La figure 6 montre la variation du facteur de pic radial  $F_{xy}$  en fonction de l'épuisement pour la gestion de référence et pour un coeur à cent soixante crayons à 1 % Gd sur un combustible enrichi à 2,30 % en U 235.

On trouve dans ce cas un écart dans la concentration initiale de bore, par rapport à une gestion de référence, qui atteint - 103 pcm, ainsi qu'une réduction du coefficient de température du modérateur de 1,7 pcm/° C.

De nombreuses autres variantes de réalisation sont possibles. L'assemblage peut être de l'un quelconque des types connus, ayant un réseau dont le nombre de noeuds varie entre 14 x 14 et 20 x 20. Les crayons contenant du gadolinium à la seconde teneur peuvent avoir l'une quelconque de nombreuses dispositions respectant une symétrie de révolution d'ordre 4. En particulier des crayons contenant du gadolinium à la seconde teneur peuvent être placés dans la rangée de rive ; des crayons peuvent être à des noeuds adjacents à l'emplacement d'un tube guide ou du tube d'instrumentation. Si aucun tube d'instrumentation central n'est prévu, un crayon contenant du gadolinium à la seconde teneur peut être placé au centre de l'assemblage.



## REVENDICATIONS

1. Assemblage combustible pour réacteur à eau sous pression, comprenant des crayons répartis aux noeuds d'un réseau carré et contenant du matériau combustible, certains des crayons (14) ayant une première teneur massique en gadolinium, comprise entre 5 et 12 %, caractérisé en ce que quatre à douze crayons supplémentaires (16) ont une seconde teneur massique en gadolinium, comprise entre 0,5 et 2 %.

2. Assemblage selon la revendication 1, caractérisé en ce que le combustible des crayons contenant du gadolinium à la seconde teneur est constitué par de l'oxyde d'uranium à un enrichissement en U 235 inférieur ou égal à ce lui des crayons avoisinants qui ne contiennent pas de gadolinium.

3. Assemblage selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le combustible des crayons contenant du gadolinium à la première teneur est constitué par de l'oxyde d'uranium naturel, appauvri ou enrichi en uranium 235.

4. Assemblage selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les crayons contenant du gadolinium à la première teneur sont au nombre de quatre à vingt.

5. Assemblage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'il comporte quatre crayons à 1 % de gadolinium, situés à des emplacements sur les diagonales du réseau dans la dernière rangée avant la rangée de rive.

6. Assemblage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les crayons contenant du gadolinium à la seconde teneur sont répartis, avec une symétrie de révolution d'ordre 4, dans la rangée de rive.

7. Assemblage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 et 6, caractérisé en ce que les crayons contenant du gadolinium à la seconde teneur sont répartis, avec une symétrie de révolution d'ordre 4, en des noeuds du réseau

adjacents aux noeuds occupés par des tubes guides ou un tube d'instrumentation central.

5 8. Assemblage selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dépourvu de tube d'instrumentation central, caracté-  
risé en ce qu'un crayon contenant du gadolinium à la seconde  
teneur est placé au centre de l'assemblage.

10 9. Procédé d'exploitation de réacteur, à plusieurs passa-  
ges successifs d'un même assemblage dans le réacteur à des  
emplacements différents dans le coeur, caractérisé en ce que  
l'on répartit dans le coeur d'une part des assemblages selon  
l'une quelconque des revendications précédentes, à huit  
crayons contenant du gadolinium à la première teneur, à  
proximité de la périphérie du coeur, et d'autre part des  
assemblages suivant l'une quelconque des revendications  
15 précédentes.

1/2

FIG. 1.

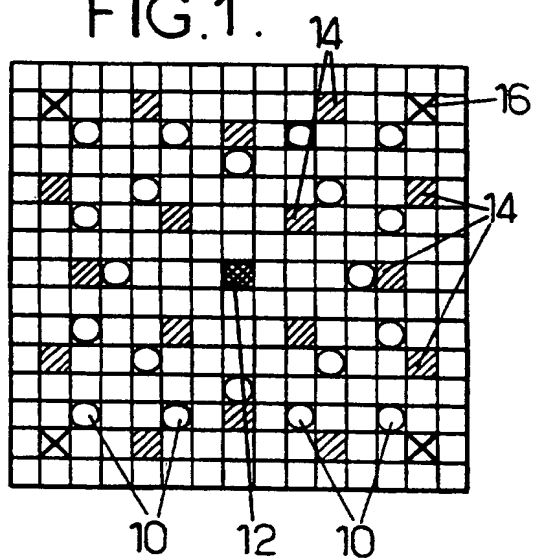


FIG. 3.

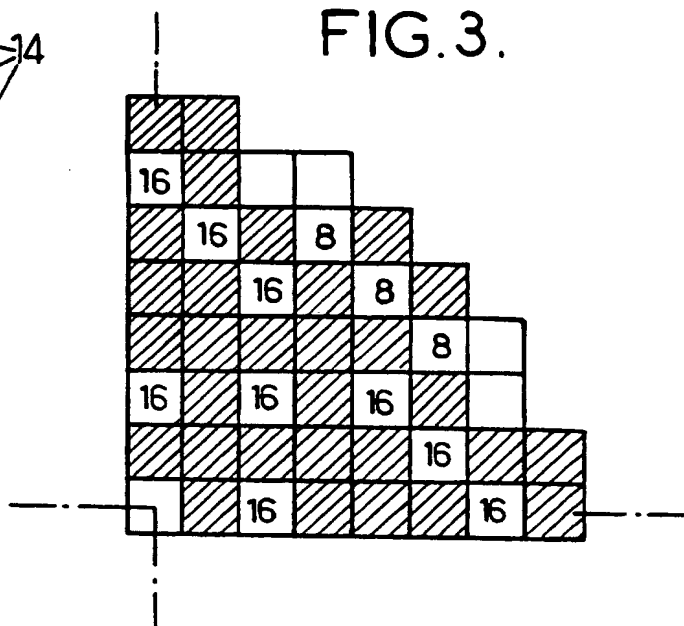
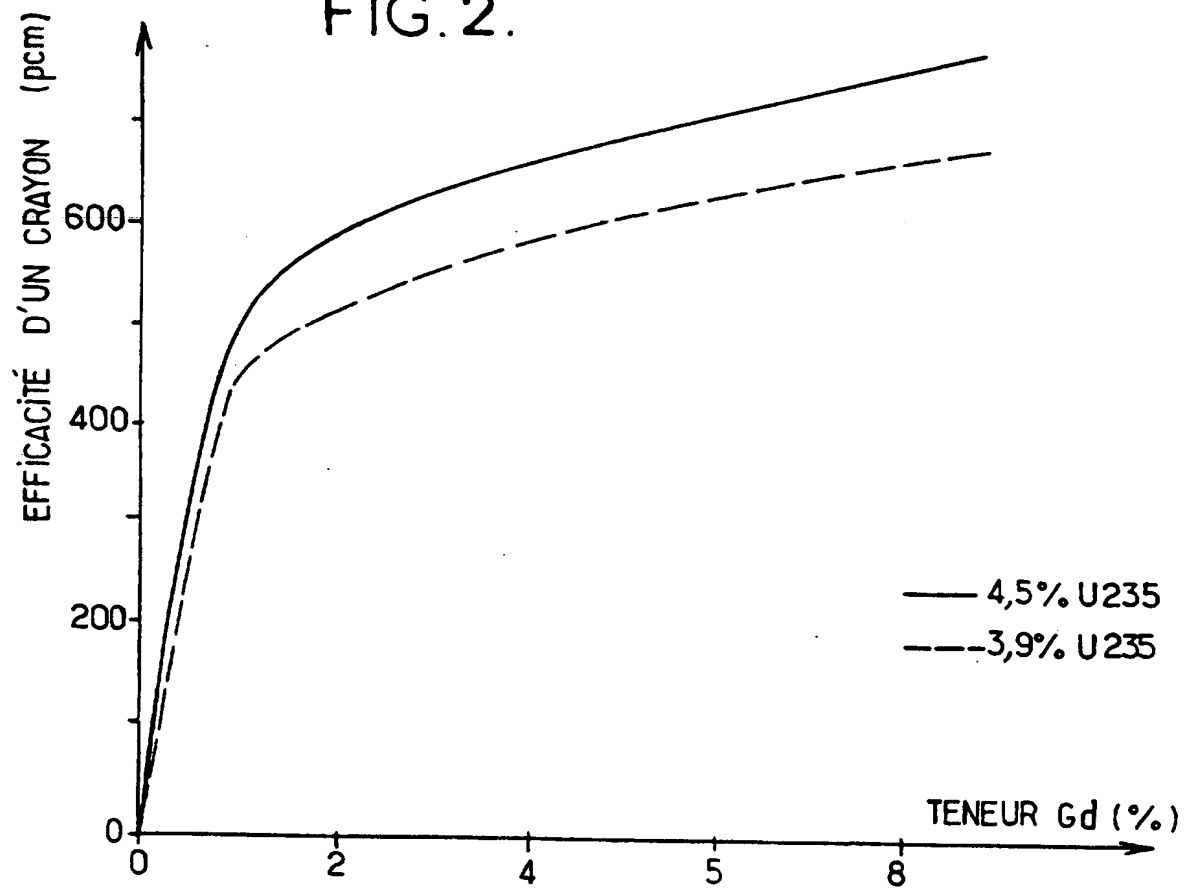


FIG. 2.



# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

L. ande Internationale No  
PCT/FR 95/01700

**A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE**  
CIB 6 G21C3/326

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

**B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE**

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)  
CIB 6 G21C

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)

**C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS**

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP,A,0 155 865 (FRAMATOME & CIE) 25 Septembre 1985 voir page 7, ligne 29 - page 8, ligne 8; figures 1,2,4	1,3,4
A	EP,A,0 369 305 (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP) 23 Mai 1990 voir colonne 3, ligne 36 - ligne 55 voir colonne 4, ligne 25 - ligne 44 voir colonne 8, ligne 46 - colonne 9, ligne 1 voir colonne 9, ligne 14 - ligne 36; figures 2,3,8,9	1,6,7

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

\* Catégories spéciales de documents cités:

- \*A\* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- \*E\* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- \*L\* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- \*O\* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- \*P\* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- \*T\* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- \*X\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- \*Y\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- \*&\* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

18 Avril 1996

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

26. 04. 96

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Europeen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+ 31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax (+ 31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Jandl, F

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

D de Internationale No  
PCT/FR 95/01700

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	KERntechnik, vol. 52, no. 4, Août 1988, MUNCHEN DE, pages 2245-249, XP002000895 FRANCILLON ET AL.: "Fuel management at Fragema: experience, assents, perspectives" voir page 248 ---	1,9
A	US,A,4 587 090 (MOCHIDA TAKAAKI ET AL) 6 Mai 1986 voir colonne 3, ligne 43 - ligne 65; figure 2 -----	1

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs : membres de familles de brevets

Demande internationale No

PCT/FR 95/01700

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP-A-0155865	25-09-85	FR-A- 2559943	23-08-85
		DE-A- 3563133	07-07-88
		JP-C- 1828190	28-02-94
		JP-A- 61000787	06-01-86
		US-A- 4649020	10-03-87
EP-A-0369305	23-05-90	JP-A- 2187696	23-07-90
US-A-4587090	06-05-86	JP-A- 59084184	15-05-84